

vzájemně doplňují tak, aby pokryly široké spektrum pohybových nároků za různých situací. Tato redundance zajišťuje zachování funkceschopnosti i při poškození jednoho ze zúčastněných systémů.

Vestibulární labyrint je v několika směrech unikátní: jako jediný je schopen přímého měření směru tíhového vektoru, rychlosti a polohy hlavy při pohybu. Vyniká rychlostí a přesností, je funkční i při velmi rychlých pohybech, při kterých ostatní smyslové systémy selhávají.

Vestibulární systém je nezbytný pro kalibraci vizuálních a somatosenzorických vstupů, ale i pro schopnost správného vnímání tělového schématu.

Jak rovnovážný smysl vznikl a měnil se v průběhu vývoje živých organismů?

Konstrukce smyslu pro rovnováhu je určena fyzikálními zákony, především působením gravitace. Pro určení směru gravitačního vektoru existují dvě možnosti: měření sil působících na tělo při pohybu (somatosenzorický systém) a měření akcelerace v určeném bodě. Druhá možnost vyžaduje specializovaný, strategicky umístěný orgán, u obratlovců v hlavě.

Princip činnosti orgánů registrujících změny akcelerace (lineární i rotační) je vždy stejný – prvek o vysoké měrné hmotnosti (zrno, perlička, kamínek) působí vlastní vahou na smyslové buňky, které zprostředkují informaci o směru působení tíže.

Nejsložitější orgány vnímání pohybu a polohy jsou vyvinuty u lidoopů a člověka, ale jejich základní plán je již plně vyvinut u primitivních obratlovců – ryb a obojživelníků.

Jde tedy o orgány vývojově velice staré, které jen omezeně podléhají evolučním tlakům, protože i malá změna má obvykle následky ovlivňující přežití.

Na druhou stranu mají i drobné změny velký funkční význam a sledování detailů anatomie se ukazuje jako pomůcka pro studium vývoje obratlovců včetně hominidů.

Anatomické detaily labyrintu ukazují na příbuzenské vztahy i na přizpůsobení specifickým pohybovým nárokům.

Roli hraje držení hlavy, postavení očí i velikost, váha a „životní styl“ živočicha.

Biomechanika smyslu pro rovnováhu

Citlivost labyrintu závisí na rozměrech polokruhového kanálku: při zvětšení poloměru se zvyšuje citlivost. Citlivost je nejvyšší v rozsahu pohybů charakteristických pro daného živočicha.

Průměr kanálku určuje pohyb endolymfy – větší průměr znehodnocuje signál tvorbou vírů.

U člověka je poloměr vertikálních kanálků 10 až 12 mm a 12 až 15 mm u horizontálního kanálku. To odpovídá vyšší citlivosti v horizontále. U člověka je průměr kanálku 0,6 mm.

Intenzita odpovědi závisí na sklonu roviny pohybu k rovině kanálku. Pokud je pohyb v rovině kanálku, je odpověď nejsilnější. Čím je odchylka větší, tím je stimulace menší.

Z těchto zákonitostí vyplývají omezení, která musí systém splňovat a určují jeho anatomické uspořádání.

Tři kanálky, pro každou rovinu prostoru jeden, zaručují přesnou registraci pohybů v prostoru.

Lineární zrychlení a gravitaci snímají makulární orgány – vertikální sakulus a horizontální utrikulus.

Vnímání tíže u nejjednodušších živočichů – prvoci, láčkovci, měkkýši

Prvoci se při pohybu v prostředí řídí především světlem (fototaxe) a chemicky (chemotaxe). Při jejich rozměrech a hmotnosti by se dalo předpokládat, že gravitace má pro tyto organismy malý význam. Přesto se u některých prvoků vytvořila nitrobuňčná tělíska, ve kterých roli gravitačního senzoru plní krystaly barytu, ukotvené v síti vláken buněčného skeletu – tzv. Müllerovy vakuoly. Vyskytují se zejména u větších prvoků a těch, kteří žijí v hustším médiu.

Mezi prvoky s prokázanou gravicepcí se řadí bičíkovci Euglena a Chlamydomonas. Jako gravitační senzor slouží tzv. paramylonská tělíska v bazální části bičíku. U nálevníků rodu Loxodes najdeme výše uvedené Müllerovy vakuoly. Bursaria je jeden z největších nálevníků, přestože vykazuje gravitaxi, její mechanismus není objasněn. Vnímání gravitace se u prvoků vyvinulo nezávisle na mnohobuněčných organismech. Tyto evoluční konvergence ilustrují, jak se i u jednoduchých organismů mohou

vyvinout sofistikované mechanismy pro percepci prostoru. Percepce gravitace je doložená i u koloniálních bičíkovců, kde slouží koordinaci pohybu bičíků (Romanova et Moroz, 2024).

Medúzy patří do kmene žahavců (Cnidaria). Vnímání polohy zajišťují buňky zvané statocysty umístěné po okrajích zvonu. Statocysty obsahují krystalky – statolity, jejichž gravitační působení buňky stimuluje. To jim umožňuje orientovat se v prostoru, udržovat stabilní polohu a koordinovat pohyby chapadel. Ačkoliv jsou statocysty u medúz méně komplexní než orgány rovnováhy u vyšších živočichů, plní stejnou funkci při vnímání gravitace a udržování rovnováhy. Je to příklad evoluční konvergence, kdy se u organismů z různých vývojových linií vyvinuly podobné struktury a mechanismy.

U nejpokročilejších měkkýšů – hlavonožců – se vyvinul systém pro vnímání lineárního a úhlového zrychlení velmi podobný vestibulárnímu aparátu obratlovců a člověka.

Skládá se ze dvou statocyst umístěných symetricky po stranách mozku. Každá statocysta obsahuje makulární orgán citlivý na vnímání zemské tíže a až devět smyslových proužků (tzv. crista – hřebínek) umístěných v navzájem kolmých pružích, které jsou stimulovány zrychlením při pohybu v prostoru. Toto uspořádání velmi přesně odpovídá labyrintovému orgánu vnitřního ucha obratlovců a je i stejně citlivé.

Studie provedená na chobotnici *Octopus vulgaris* prokázala jejich schopnost vnímat rotaci. Při otáčení chobotnice kolem vertikální osy změny v aktivitě nervových buněk byly závislé na směru a rychlosti rotace.

Rovnováha u členovců – hmyz a korýši

Hmyz využívá pro vnímání prostoru a pohybu smyslové vlásky na zevní kostře tykadel, končetin a hlavy, tzv. *chordotonální* orgány. Vzhledem k nízké hmotnosti musí mít orgány registrující pohyb vysokou citlivost.

Příkladem chordotonálního orgánu je protosternální ploténka – pole vláskových buněk na spoji hlavy a hrudníku, které snímají polohu hlavy vůči zbytku těla. Podobné smysly jsou i na kloubech končetin a jiných tělesných spojích. Jsou doloženy již u nejstarších zástupců hmyzu, např. u vážek. Exoskeleton hmyzu je vybaven senzitivními vlákny, která